

Fiatal csillagok térben és időben

Doktori értekezés tézisei
Szegedi-Elek Elza

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizika Doktori iskola

Részecskefizika és csillagászat program

Doktori iskola vezetője: Dr. Palla László

Doktori program vezetője: Dr. Csikor Ferenc

Témavezető: Dr. Kun Mária, tudományos tanácsadó

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

Budapest

2014

Bevezetés

A csillagkeletkezés során a 10–100 K hőmérsékletű, 10^{-22} g/cm³ sűrűségű, 10^2 – 10^5 M_☉ tömegű molekulafelhőkből csillagok alakulnak ki, amelyek centrális hőmérséklete $\sim 10^7$ K, sűrűségük ~ 1 g/cm³, tömegük ~ 1 –100 M_☉. Dolgozatomban a csillagkeletkezés azon szakaszait vizsgáltam, amelyeket már nem rejt el a sűrű porfelhő a kíváncsi tekintetek elől, optikai tartományban is megfigyelhetőek.

A Nap típusú csillagok keletkezése két fő szakaszból áll. A protosztelláris (fő akkréciós) fázisban épül fel a csillag tömegének $\sim 90\%$ -a. A fő akkréciós fázis hossza $\sim 10^5$ év. A protocsillag spektrális energiaeloszlása megfelel egy 50 – 100 K fekete test sugárzásának. A felhőmag összelapul, és protosztelláris akkréciós korong jön létre a születőben lévő csillag körül. A kollapszus során a korong anyagutánpótlást kap a buroktól, a csillag tömege pedig a korongból a csillagra zuhanó anyag által nő.

A csillagkeletkezés folyamatában rövid átmeneti fázist képviselnek az I. osztályú spektrális energiaeloszlású források a protocsillagok és a fősorozat előtti csillagok között. A spektrális energiaeloszlás alakja egy magasabb hőmérsékletű feketetest-sugárzásával és a sugárzás még nagyobb részét kitevő infravörös többlettel jellemezhető, amely a hosszabb hullámhosszak felé nő. A fősorozat előtti fejlődési szakasz elején a protocsillagokhoz képest már jelentősen csökken a csillag akkréciós rátája, de a születőben lévő csillag még beágyazott, körülveszi a burok, amelyben létrejött. A csillag körüli protosztelláris korongból anyag áramlik át a csillagra a zárt mágneses erővonalak mentén. Az átáramló gáz széles emissziós vonalakat hoz létre a csillag optikai spektrumában. Az így létrejövő vonalak közül a H α -vonal a legmarkánsabb, emiatt ez a vonal fiatal, akkretáló csillagok kiváló nyomjelzője. A nyílt mágneses erővonalak mentén a nagy impulzusnyomatékú ionizált gáz kirepül a rendszerből, magnetocentrifugális szél alakul ki. Ennek a fejlődési szakasznak a végére a magnetocentrifugális szél szétfújja a csillagot rejtő burkot, optikailag is láthatóvá válik a csillag.

A fősorozat előtti csillagokat a prototípus után klasszikus T Tauri csillagoknak is nevezik. A csillag spektrális energiaeloszlása II. osztályú. A spektrális energiaeloszlás alakja egy feketetest-sugárzással és a hosszabb hullámhosszak felé csökkenő infravörös többlettel jellemezhető. Az infravörös többlet a csillag körüli poros korongtól származik. Ebben a fejlődési szakaszban a csillag a Kelvin–Helmholtz-időskálán fej-

lódik: lassú, kvázisztatikus kontrakció során a csillag centrális hőmérséklete egyre nő, míg el nem éri a hidrogénfúzióhoz szükséges 15 millió kelvint.

A fősorozat előtti fejlődés alatt a csillag körüli korong is folyamatos fejlődésen megy keresztül. A korongban lassan leáll az akkréció, úgynevezett passzív korong jön létre. Végül a korongban bolygórendszer alakul ki a csillag körül, a korong megmaradt anyagát alkotó gáz és por nagy része is széteszik. Ekkor a csillag spektrális energiaeoszlásának alakja már III. osztályú, vagyis alakja megegyezik egy feketetest-sugárzásáéval, járulékként egy kis infravörös többlettel. Ekkor a csillag már gyenge vonalú T Tauri.

Célkitűzések

Doktori munkám során Nap típusú csillagok fejlődésének korai szakaszait tanulmányoztam megfigyelési adatok alapján. Két aspektusból is vizsgáltam a fősorozat előtti csillagokat. Térbeli vizsgálatom célpontja az Orion-halmaz volt. Ebben a halmazban egy helyen keletkeznek kis és nagy tömegű csillagok is. Céлом volt a fiatal, $H\alpha$ -emissziós források azonosítása, és annak vizsgálata, hogy rés nélküli spektroszkópiát alkalmazva milyen új ismereteket szerezhethünk a már részletesen tanulmányozott csillagkeletkezési régióról.

Időbeli vizsgálat során nyolc olyan I. osztályú és lapos spektrális energiaeoszlású forrást tanulmányoztam, amelyek a spektrális energiaeoszlás alapján ránézésre azonos fejlődési fázisban vannak: a fő akkréciós (protosztelláris) és a fősorozat előtti fejlődés határán. Ebben a néhányszor 10^4 évben oszlik el a csillagkörüli burok, ezért ezekben a csillagokban heves változások várhatóak. Több évig nyomon követtük a csillagok fényességének változását, és eltérő időpontokban spektrumok is készültek a lehetséges színképi változások kimutatására. Fő cél a változásokat okozó fizikai folyamatok feltárása volt.

Megfigyelések és adatredukálás

A dolgozatban bemutatott eredmények jelentős része saját megfigyeléseimen alapul. Munkám során hosszú időt töltöttem megfigyeléssel és az adatok feldolgozásával.

Távmefigyeléseket végeztem a Hawaii Egyetem 2,2 m-es teleszkópjára szerelt

Wide Field Grism Spectrograph–2 (WFGS2) nevű műszerrel. A felméréshez egy 300 vonal/mm beosztású, $3,8 \text{ \AA}/\text{pixel}$ diszperziójú grismet használtam, amelynek felbontóképessége $\lambda/\Delta\lambda$ 820. Az alkalmazott $H\alpha$ -szűrő áteresztési tartománya 500 \AA , 6515 \AA központi hullámhossz körül.

A piszkésetetői felvételek többsége 2008–2012 között a 60/90 cm átmérőjű Schmidt-távcsővel készült. A fotometriai megfigyelések másik része az 1,016 m átmérőjű, Ritchey–Chrétien zerelésű távcsővel készült.

A piszkésetetői és hawaii felvételek kiértékelését egyaránt a National Optical Astronomy Observatory IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) és FITSH nevű csillagászati képfeldolgozó programok segítségével végeztem.

Tézisek

$H\alpha$ -emissziós csillagok az Orion-halmazban

1. A $H\alpha$ -felmérés során 587 $H\alpha$ -emissziós forrást azonosítottam az Orion-halmaz egy négyzetfok nagyságú területén. Kilencvenkilenc csillag eddig egyetlen $H\alpha$ -emissziós felmérésben sem szerepelt. 559 csillag esetében meghatároztam a $H\alpha$ -vonal ekvivalens szélességének értékét, majd ezen érték alapján 372 csillagot a klasszikus, míg további 187 csillagot gyenge vonalú T Tauri csillagként osztályoztam.

Irodalmi adatokkal összehasonlítottam az ekvivalens szélesség általam mért értékeit: néhány éves időskálán a minta túlnyomó részében 2–3-szoros változások figyelhetők meg.

2. Vizsgáltam a $H\alpha$ -vonal ekvivalens szélességének értéke és a többi csillagparaméter között rejlő esetleges kapcsolatokat:

- A spektrális energiaeloszlás alakja alapján a klasszikus T Tauri csillagok II. osztályú, koronggal övezett csillagok, míg a gyenge vonalú T Tauri csillagok két elkülönülő csoportot alkotnak: vannak II. osztályú, koronggal övezett, illetve III. osztályú, korong nélküli gyenge vonalú T Tauri csillagok.

- Az elméleti eredményekkel egybehangzóan a mintában a klasszikus T Tauri csillagok forgási periódusa hosszabb, mint a gyenge vonalú T Tauri csillagoké.
- Az XMM-Newton adatbázisban azonosítottam a $H\alpha$ -források röntgen-megfelelőjét. Megállapítottam, hogy a gyenge vonalú T Tauri csillagok közül jelentősen többet detektált az XMM-Newton, mint a klasszikus T Tauri csillagok körében. A detektált, illetve nem detektált források tulajdonságait összehasonlítva jelentős eltérések tapasztalhatóak a két csoport között, kivéve a rotációs periódus hosszát. A legszembevetőbb eltérés a $H\alpha$ -vonal ekvivalens szélességének értékében adódik: a röntgen-artományban detektált klasszikus T Tauri csillagok ekvivalens szélesség értéke jóval kisebb, mint a nem detektáltaké. Ez azt bizonyítja, hogy az akkréciós oszlopokban elnyelődik a röntgensugárzás.

Nap típusú csillagok a fősorozat előtti fejlődés kezdetén

3. A méréseink azt mutatják, hogy a megfigyelési időszak során a PV Cephei, V1180 Cas, [KP93]2-1, [KP93]2-2, [K98C]Em*58 nagy amplitúdójú (2–4 magnitúdó) fényességváltozás jellemzi. A változásokat a látóirány mentén változó extinkció és az akkréciós ráta ~ 1 nagyságrendű változékonysága okozta. Az NGC 7023 RS10, [ADM95] IRAS-6 valamint az IRAS 02086+7600 csillagok mindössze néhány tized magnitúdónyi változást mutattak. Az első két esetben a szín-fényesség diagram alapján a változások jól magyarázhatóak a látóirány mentén változó extinkcióval, míg az IRAS 02086+7600 forrás esetén további, részletesebb megfigyelések és a jelen adatok újraértékelése szükséges.
4. A fiatal csillagok akkréciós luminozitását a $H\alpha$ és az infavörös Ca II 8542 Å -ös emissziós vonal fluxusából határoztam meg, majd empirikus képlettel akkréciós rátát számoltam a luminozitásból: a nyolc csillag közül a PV Cephei, [KP93]2-1, [KP93]2-2, V1180 Cas valamint az [ADM95] IRAS-6 források akkréciós rátája ($10^{-6} - 10^{-7} M_{\odot}/\text{év}$) nagy az átlagos T Tauri csillagok akkréciós rátájával ($10^{-8} M_{\odot}/\text{év}$) összehasonlítva. Az NGC 7023 RS10, IRAS 02086+7600 és a [K98C]Em*58 csillagok akkréciós rátája ($10^{-9} - 10^{-11} M_{\odot}/\text{év}$) viszont kicsi az átlagos rátával összehasonlítva.

5. A PV Cephei és a V1180 Cas feltehetően tagja a fiatal eruptív csillagok új, körvonalazódó osztályának. Fényességváltozásuk amplitúdója összehasonlítható a FUorok és EXorok fényességváltozásával, de többi tulajdonságuk eltér a klasszikus osztályokétól. A csillagok közös jellemzője az I. osztályú vagy lapos spektrális energiaszlás, a néhány éves halvány és fényes időszakok változása, a megugró akkréciós ráta, a klasszikus T Tauri csillagokra jellemző emissziós spektrum. A változások oka az akkréciós rátában fellépő változások és az ennek következtében fellépő változások az extinkcióban.

Következtetések

A doktori kutatómunkám fő célja a Nap típusú csillagok korai fejlődésének vizsgálata volt a megfigyelési adatok tükrében.

A $H\alpha$ -felmérés során alkalmazott rés nélküli spektroszkópiai eljárás kiváló eszköz a csillagkeletkezési régiók vizsgálatára: a részletesen tanulmányozott Orion-halmazban 99 új, mások által eddig nem detektált $H\alpha$ -forrást azonosítottam, emellett 488 olyan csillagot is azonosítottam, amelyeket korábbi $H\alpha$ -felmérések során fedeztek fel. A korábbi $H\alpha$ -felméréseket összehasonlítva a saját $H\alpha$ -felmérésemmel jól demonstrálható, hogy a rés nélküli spektrográf hatékony eszköz a fiatal $H\alpha$ -emissziós csillagok azonosítására.

A hosszú távú fotometriai és spektroszkópiai mérések alapján a nyolc csillagból hét csillag esetében azonosítottuk a megfigyelt változások háttérében álló fizikai okokat. Az eruptív csillagok új osztályának két tagját is tanulmányoztuk. Az eruptív csillagok fényességváltozásának amplitúdója hasonlít az EXorokéhoz, de az EXoroknál korábbi fejlődési állapotban vannak.

A tézisek alapjául szolgáló publikációk

- Szegedi-Elek, E., Kun, M., Reipurth, B., Pál, A., Balázs, L. G., Willman, M.: *A New $H\alpha$ Emission-line Survey in the Orion Nebula Cluster* 2013, ApJS, 208, 28
- Kun, M., Szegedi-Elek, E., Moór, A., Ábrahám, P., Acosta-Pulido, J. A., Apai, D., Kelemen, J., Pál, A., Rácz, M., Regály, Zs., Szakáts, R., Szalai, N., Szing,

A: A Peculiar Young Eruptive Star in the Dark Cloud Lynds 1340, 2011, ApJ, 733L, 8

- Kun, M., Szegedi-Elek, E., Moór, A., Kóspál, Á., Ábrahám, P., Apai, D., Kiss, Z. T., Klagyivik, P., Magakian, T. Yu., Mező, Gy., Movsessian, T. A., Pál, A., Rácz, M., Rogers, J.: *Inner disc rearrangement revealed by dramatic brightness variations in the young star PV Cep*, 2011, MNRAS, 413, 2689